

Рис. 4. Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости химических реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка при  $T_{cp} = 1500\text{ K}$  и  $T_a = 100\text{ K}$ ,  $T_a = 200\text{ K}$ ,  $T_a = 300\text{ K}$

**Заключение.** На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Суммарное действие нестационарной температуры и давления на скорость химической реакции носит синергичный характер.
2. На скорость химической реакции при одновременных пульсациях температуры и давления влияют амплитудное значение температуры, амплитудное значение давления, энергия активации и порядок реакции.
3. При колебаниях давления и температуры, возникающих при пульсирующем горении, скорость горения возрастает. Следствием этого является увеличение теплонпряженности топочного объема и повышение эффективности сжигания, как метода термического обезвреживания промышленных отходов с низкой концентрацией загрязняющих веществ.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю профессору Северянину Виталию Степановичу за постановку задачи исследования, указания и рекомендации по расчетам, анализу результатов, выбору направления дальнейших научных поисков.

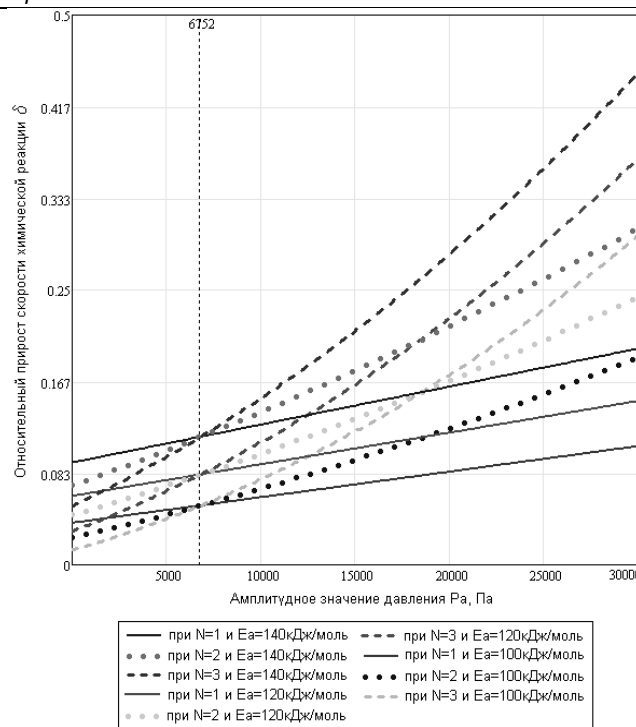


Рис. 5. Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости химических реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка при  $T_{cp} = 1500\text{ K}$ ,  $T_a = 100\text{ K}$  и энергии активации  $E_a = 100\text{ кДж/моль}$ ,  $E_a = 120\text{ кДж/моль}$ ,  $E_a = 140\text{ кДж/моль}$

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Технологическое пульсационное горение / В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Аввакумов, В.Я. Лысков, Я.М. Щелоков / Под ред. В.А. Полова – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
2. Новосельцева, Д.В. Анализ влияния изменения давления на физико-химические процессы взаимодействия компонентов при нестационарных режимах горения // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология.
3. Новосельцева, Д.В. Влияние пульсаций температуры на макрокинетику реакций при термической очистке вентиляционных объектов сельского хозяйства // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. – Мн.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2012. – № 46.
4. Жилин, Д.М. Теория систем. – М.: УРСС, 2004. – 183 с.
5. Северянин, В.С. Оценка эффективности нестационарных топочных процессов // Вестник БГТУ. – 2003. – №2(20): Водохозяйственное строительство. Теплоэнергетика. Экология. – С. 33–36.

Материал поступил в редакцию 13.03.13

**NOVOSELTSEVA D.V. Total action of non-stationary pressure and temperatures for speed of chemical reaction**

Influence of simultaneous fluctuations of pressure and temperatures for speed of chemical reaction is analysed at pulsing burning. Dependences of a relative gain of speed of reactions of the first, second and third order on peak value of pressure, peak value of temperature and energy of activation are received.

УДК 621.311.25, 620.9

Янчилин П.Ф.

**ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНЦЕНТРАТОРА ГЕЛИОУСТАНОВКИ “ЛУЧ”**

**Введение.** В Беларуси уровень солнечной освещенности достаточен для развития и применения в народном хозяйстве устройств, улавливающих солнечную энергию и преобразующих её в другие виды энергии. При проектировании гелиосистем необходимо знать количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверх-

ность, нормально ориентированной к падающим лучам, т.к. среднесуточный приход прямой солнечной радиации на такую теплопринимающую поверхность увеличивается на 28-30% по сравнению с приходом на горизонтальную поверхность [1].

Серьезным препятствием на пути эффективной реализации вы-

Янчилин П.Ф., аспирант Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

сокого энергетического потенциала солнечного излучения является его низкая плотность, обусловленная большой удаленностью Земли от Солнца. Преодолеть это противоречие можно лишь путем концентрирования излучения, позволяющего в совокупности с другими мероприятиями приблизить КПД преобразователей солнечной энергии к термодинамическому пределу.

В научно-исследовательской лаборатории «ПУЛЬСАР» БрГТУ разработана под руководством профессора, д.т.н. Северянина Виталия Степановича гелиоустановка «ЛУЧ». Основными особенностями этой установки являются расщепление параболаида вращения на отдельные конусы и состоящий из них гелиоконцентратор (в виде группы концентрических конусов, имеющих общий фокус на теплоприёмнике), и – ориентирование на Солнце механизмом слежения.

**Условия концентрирования солнечного излучения.** Основное функциональное назначение концентрирующей системы в общем случае – повышение плотности потока солнечного излучения до уровня, обеспечивающего его эффективное и экономичное преобразование в энергию требуемого вида. Интегральным показателем, характеризующим эту функцию системы, является средний коэффициент концентрации  $K_C$ , который определяется как отношение среднего значения плотности сконцентрированного лучистого потока на приемнике  $E_{e\text{cp}}$  к поверхностной плотности солнечного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению его распространения,  $E_C$ :

$$K_C = \frac{E_{e\text{cp}}}{E_C}. \quad (1)$$

Характерные для солнечных энергетических установок оптимальные значения  $K_C$  лежат в диапазоне от единиц до сотен [2]. При концентрировании солнечного излучения не только повышается его плотность, но и изменяется распределение в пространстве, а следовательно, и на лучевоспринимающих поверхностях. Поверхностная облученность  $E_e$  в общем случае характеризуется функцией вида:

$$E = E_e(x_n, y_n, z_n), \quad (2)$$

где  $x_n, y_n, z_n$  – координаты точки приемника.

Также она может характеризоваться соответствующим распределением значений локального коэффициента концентрации солнечного излучения:

$$K_e = \frac{E_e}{E_C} = K_e(x_n, y_n, z_n). \quad (3)$$

Это распределение является основной энергетической характеристикой концентрирующей системы.

Требования к распределению плотности сконцентрированного излучения существенно зависят от типа преобразователя, особенностей организации рабочих процессов в его элементах и их конструкции. В фотоэлектрических установках, содержащих множество последовательно и параллельно соединенных элементов, которые должны работать в одинаковых условиях, с целью уменьшения схемных потерь необходимо обеспечивать равномерное облучение всех элементов, т.е. должно выполняться условие  $K_e(x_n, y_n, z_n) \approx \text{const}$ . Если же фотоэлектрическая установка состоит из отдельных модулей, каждый из которых содержит один элемент, объединенный с концентратором, требование его равномерности облучения не является обязательным, а в некоторых случаях даже желательно обеспечить определенным образом заданную неравномерность распределения плотности лучистого потока на элементе. Соответственно различной будет и чувствительность характеристик к изменению распределения облученности на элементе в процессе эксплуатации установки за счет неточной ориентации концентраторов на Солнце, действия на них различного вида нагрузок (ветровых, инерционных) и других факторов. Все эти обстоятельства учитываются в комплексе при выборе типа и параметров концентрирующей системы.

Для концентратора гелиоустановки «ЛУЧ», когда в фокусе находится не фотоэлектрический элемент, а приёмник тепловой энергии, например полая сфера, заполненная циркулирующим теплоносителем,

обеспечивающим перенос тепла к потребителю, требование равномерности его облучения является необязательным, скорее всего важнее будет обеспечить более полную освещённость поверхности приёмника тепла.

Системы концентрирования солнечного излучения (КСИ) относятся к классу оптических систем, но по назначению принципиально отличаются от оптико-информационных систем этого класса, которые служат для получения качественного изображения наблюдаемых объектов. По функционально-целевому признаку системы КСИ могут быть определены как оптико-энергетические системы, предназначенные в общем случае для повышения плотности потока лучистой энергии при его одновременном пространственном и спектральном перераспределении. Этим в значительной мере обусловлено и различие требований к характеристикам систем КСИ и оптико-информационных систем.

Схемные и конструктивные варианты систем КСИ весьма многообразны. Их классификация осуществляется на основе различных признаков. Определим положение нашего типа концентратора.

По уровню повышения плотности солнечного излучения или степени его концентрирования, характеризваемой значением  $K_C$ , системы КСИ с определенной условностью можно разделить на слабоконцентрирующие ( $K_C < 100$ ) и сильноконцентрирующие ( $K_C \geq 100$ ) системы. Дополнительным классификационным признаком здесь может служить степень равномерности распределения плотности сконцентрированного излучения  $E_e$  или локального коэффициента концентрации  $K_e$  на приемнике, которая характеризуется соответствующими производными по направлениям ( $dE_e/dx, dK_e/dx$  и т.п.). По этому признаку различают системы КСИ, обеспечивающие равномерную и неравномерную облученность СЭ. По предварительным экспериментальным данным концентратор гелиоустановки «ЛУЧ» можно отнести к слабоконцентрирующим и обеспечивающим неравномерную облученность поверхности приёмника.

По характеру взаимодействия излучения с оптическими элементами систем КСИ подразделяют на отражающие (зеркальные) и преломляющие (линзовые) системы. Разрабатываемый концентратор «ЛУЧ» относится к отражающим (зеркальным) системам.

По воздействию на спектральные характеристики сконцентрированного излучения различают селективные и неселективные системы. Здесь всё зависит от исполнения поверхности приёмника, если с селективным покрытием, то первое, если поверхность обычная, то второе.

По числу оптических элементов, последовательно участвующих в процессе концентрирования излучения, системы КСИ разделяют на одно- и многоэлементные (чаще всего двухэлементные) системы. Заметим, что к многоэлементным системам КСИ в гелиотехнике относят также полигелиостатные системы. В нашем случае один концентратор «работает» на один приёмник, значит, относится к одноэлементным системам, но он состоит из нескольких отражающих элементов – составной.

Приведенные выше классификационные признаки связаны главным образом со свойствами оптических элементов рассматриваемых систем. Однако в состав систем концентрирования входят также различные силовые элементы, юстировочные приспособления и т. п. Их конструктивные различия увеличивают многообразие возможных вариантов систем КСИ. Предварительный выбор лучшей системы в каждом конкретном случае определяется степенью ее соответствия комплексу функциональных, конструктивных и эксплуатационных требований, важнейшими из которых являются: минимальные потери энергии при концентрировании излучения; способность устойчиво обеспечивать необходимое распределение плотности излучения на приёмнике; технологичность изготовления и монтажа; устойчивость к воздействию внешних факторов; удобство и простота эксплуатации; возможность ремонта и замены отдельных элементов; низкая стоимость и др.

Оптические схемы зеркальных концентрирующих систем можно различать по следующим признакам:

- расположению приемника в совпадающем по направлению (прходящем) или встречном по отношению к солнечному потоку сконцентрированного излучения (в первом случае приемник облучается не только отраженным, но и прямым солнечным светом);
- форме образующей отражающей поверхности (прямая, ломаная, ступенчатая или кривая 2-го порядка);
- кратности отражения излучения от элементов концентрирующей системы (с одно- и многократным отражением);
- форме в плане (линейная, многогранная, круглая).

Окончательный выбор оптимальных схемы и параметров системы КСИ производится при проектировании СЭУ в целом. Однако для этого необходимо располагать математическими моделями и методами расчета, позволяющими связывать выходные характеристики концентрирующей системы с параметрами солнечного излучения на входе в систему, а также с показателями, характеризующими реальные оптические и геометрические свойства ее элементов и эксплуатационные факторы – погрешности юстировки, деформации под действием различных нагрузок, точность ориентации на Солнце и др.

Концентрирование солнечного излучения представляет собой частный случай лучистого переноса в системе тел, разделенных диатермичной средой. Специфика данного процесса определяется свойствами первичного источника излучения – Солнца – и особенностями гелиотехнических концентрирующих систем, которые относятся к классу оптико-энергетических систем и предназначены исключительно для перераспределения потока солнечного излучения в пространстве с целью повышения его плотности (но не для получения качественного изображения Солнца). Задачи теоретического исследования систем КСИ связаны главным образом с расчетом их энергетических характеристик, чем определяется и выбор метода описания процесса переноса излучения в этих системах.

Как показано в [2], анализ энергетических характеристик оптических систем осуществляется, как правило, на основе методов теоретической фотометрии, которые успешно используются при решении задач светотехники и лучистого теплообмена, и при проектировании гелиотехнических концентрирующих систем их применение обеспечивает достаточно высокую точность расчетных оценок. Это дает нам основание ориентироваться преимущественно на фотометрический подход к описанию процесса концентрирования солнечного излучения.

В теоретической фотометрии процессы переноса излучения и его взаимодействия с поверхностями тел, участвующих в лучистом обмене, рассматриваются феноменологически. Основания фотометрии соответствуют закономерностям геометрической оптики с той разницей, что луч рассматривается не просто как нормаль к волновой поверхности, а как множество прилегающих друг к другу направлений, вдоль которых осуществляется перенос некоторого количества лучистой энергии, т.е. представляет собой физический пучок лучей малого поперечного сечения. Фотометрический подход позволяет не учитывать дифракционные явления, и заменить физический пучок лучей сходящимся или расходящимся, приписав ему всю энергию физического пучка. При этом приписываемая сходящемуся или расходящемуся пучку энергия не концентрируется в его вершине, а распределяется по элементарной площадке, представляющей собой сечение физического пучка. Узкий сходящийся или расходящийся пучок можно заменить параллельным пучком бесконечно малой ширины, т. е. фактически лучом, полагая, что такой луч тоже переносит всю энергию физического пучка [2].

Для описания процессов лучистого переноса в системах КСИ, требуется использование специальных физических коэффициентов, или функций, характеризующих микропроцессы взаимодействия излучения с телами на макроскопическом уровне. Для рассматриваемого процесса концентрирования основной величиной является коэффициент отражения солнечного излучения поверхностью зеркала  $R_c$ , учитывающий потери энергии, связанные с поглощением излучения зеркалом.

Следует дать обобщенное описание свойств всех тел (элементов), участвующих в процессе переноса и распределения лучистой энергии,

т.е. Солнца как первичного излучателя, отражающих элементов концентрирующей системы и поверхности приемника излучения.

1. Принимаем, что Солнце как бесконечно удаленный дисковый излучатель, посылает в каждую точку отражающей поверхности концентратора круговой конический пучок лучей с вершиной в этой точке. Оси всех пучков параллельны между собой. На основе фотометрического подхода заменяем круговой конический пучок параллельным пучком бесконечно малой ширины, т.е. фактически лучом, полагая, что такой луч тоже переносит всю энергию физического пучка. Основной фотометрической характеристикой излучателя является индикатриса силы излучения в пучке  $fC(\varphi)$ . Распределение плотности потока лучистой энергии, испускаемой Солнцем, по поверхности является достаточно равномерным, но объемный характер излучения приводит к спаду яркости солнечного диска от центра к краю [2]. В наших расчетах мы пренебрежем неравномерностью излучения солнечного диска и получим  $fC(\varphi)=1$ . Для нахождения абсолютных значений локальной плотности сконцентрированного излучения необходимо знать интегральные и спектральные значения плотности солнечного излучения на входе в систему. Эти показатели зависят от расстояния до Солнца, атмосферной массы и метеофакторов. Заатмосферное распределение энергии в спектре солнечного излучения близко к спектру абсолютно черного тела при температуре  $T_C \approx 5770$  К (значительная часть энергии приходится на видимую и инфракрасную часть спектра —  $\lambda = 0,4-800$  мкм), а нормальная поверхностная плотность мощности (облученность) или солнечная постоянная в околоземном пространстве характеризуется средним за год значением  $E_C \approx 1360$  Вт/м<sup>2</sup>.

2. Система концентрирования обеспечивает повышение плотности солнечного излучения главным образом за счет изменения его направления и локализации в определенной области пространства. Вследствие этого форма отражающей поверхности и ее различные отклонения от геометрически идеальной конфигурации оказывают определяющее влияние на распределение плотности сконцентрированного излучения. Любая реальная отражающая поверхность не может быть гладкой математической поверхностью и имеет различного рода отклонения – глобальные искажения формы, локальные геометрические неточности, шероховатости (микронеровности). Потери энергии при отражении учитываются коэффициентом отражения  $R_c$ , который зависит от спектральной отражательной способности зеркального покрытия в диапазоне длин волн солнечного излучения и угла его падения на отражающую поверхность. Показатели всех наиболее важных свойств отражающих поверхностей систем КСИ в общем случае являются переменными. Однако, по рекомендации [1, 2], при практических расчетах гелиотехнических концентрирующих систем влияние некоторых из вышеперечисленных показателей часто можно не учитывать. Значения  $R_c$  определяют обычно экспериментальным путем. Для нашей системы концентрации мы оставим коэффициент отражения, который учитывает все три отклонения, и зададимся его величиной, допустим  $R_c = 0,8$ .

3. Приемник в отличие от концентратора рассматривается в данном случае не как физический объект, а как абстрактная геометрическая поверхность СП, определенным образом ориентированная в поле отраженного излучения. Наш приёмник КСИ расположен в фокусе концентратора, состоящего из совокупности концентрических конусов. Он принадлежит к приёмникам открытого типа — у него отсутствует взаимное затенение элементов поверхности, освещается со всех сторон и (желательно) имеет форму сферы.

Математическое описание процесса лучистого переноса в системе «Солнце — концентратор — приемник» осуществляется в два этапа: вначале мы проанализировали взаимодействие солнечного излучения с отражающей поверхностью, а затем, определив характеристики концентратора как вторичного излучателя ( $R_c$ ), должны получить соотношения для расчета облученности поверхности приемника.

На основе приведённых данных можно сформулировать задачу концентрирования солнечного излучения в общем виде — увеличение плотности потока солнечного излучения, попадающего на кон-

центратор, для преобразования в энергию другого вида (тепловую, электрическую) на приемнике излучения.

**Расчёт концентратора «ЛУЧ».** Расчёты систем КСИ проводятся с целью решения задач анализа и синтеза этих систем. При анализе задаются и варьируются значения показателей свойств излучателя (Солнца), концентратора и приемника, а также параметров, характеризующих взаимное расположение этих элементов в пространстве, и определяются закономерности распределения  $K_e$  на поверхности приемника, т.е. энергетические характеристики концентрирующей системы. При синтезе, наоборот, задается требуемый закон распределения или среднее значение коэффициента концентрации на приемнике и определяется соответствующая геометрия лучевоспринимающих поверхностей элементов системы [2].

Для решения задач анализа и синтеза систем КСИ используются три группы методов: графоаналитические, аналитические и численные. Рассмотрим кратко особенности применения одного наиболее подходящего нам метода.

Графоаналитический метод определения энергетических характеристик концентрирующих систем основан на геометрических построениях, которые позволяют определить отображение на приемнике пучка лучей, отраженных элементарной площадкой зеркала. При этом используется закон зеркального отражения и рассматривается либо параллельный пучок лучей, либо расходящийся с угловым размером  $\Phi_0 \geq \Phi_C$ . Распределение излучения в пучке по направлениям принимается равномерным, а при необходимости учета неравномерности распределения отраженный пучок разделяют на ряд элементарных пучков с равномерным распределением. Глобальная геометрия зеркала задается обычно в виде идеальной математической поверхности определенной конфигурации. Анализ полученных при отслеживании распространения пучка геометрических фигур дает возможность выразить размеры элементарной площадки зеркала и отображения пучка на приемнике через одни и те же характерные параметры концентрирующей системы и найти их соотношение, определяющее элементарный геометрический коэффициент концентрации. Интегрирование последнего по всей отражающей поверхности позволяет определить среднее или локальное значение этого коэффициента на приемнике.

Этот метод весьма трудоемок и в целом уже не соответствует современной практике расчетов, ориентированной на использование расчетов с помощью компьютерных программ. Но в некоторых случаях, например при расчете систем с плоскими отражателями в однолучевом приближении, он позволяет достаточно быстро получить зависимость между коэффициентом концентрации и относительными размерами элементов системы, а потому может быть рекомендован для практического использования. Однако главное достоинство графоаналитического метода, не теряющее своей актуальности, связано с возможностью наглядного качественного анализа распространения лучистых потоков в системе, всегда полезного на начальном этапе исследования.

Основной энергетической характеристикой концентрирующей системы является средний коэффициент концентрации  $K_C$ , который определяется как отношение среднего значения плотности сконцентрированного лучистого потока на приемнике  $E_{e\text{ ср}}$  к поверхностной плотности солнечного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению его распространения  $E_C$ , или для круглых линз (наш концентратор является их аналогом) площадью  $F_1$  и круглых приемников площадью  $F_2$  будет равен отношению квадратов их радиусов.

При разработке концентратора было условие, что принятую за основу концентратора форму параболоида требуется изменить так, чтобы упростить его конструкцию, процесс изготовления и эксплуатации [3, 4]. В процессе преобразований, показанных на рисунке 1, получили новый вид концентратора, показанный на рисунке 2.

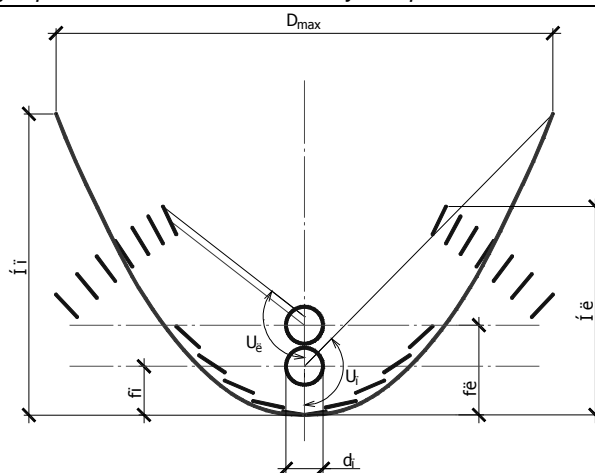


Рис. 1. Совмещение двух концентраторов и их основные размеры

Концентраторы, у которых образующая отражающей поверхности является кривой второго порядка — окружностью, параболой, гиперболой и т.п., относятся к группе сильноконцентрирующих систем. Идеальный параболоидный концентратор фокусирует параллельный пучок лучей в точку, что соответствует бесконечно большой степени концентрирования ( $K_C \rightarrow \infty$ ). Геометрию параболоидного отражателя характеризуют двумя независимыми параметрами: диаметром концентратора  $D_K$  (или фокусным расстоянием  $f_K$ ) и углом полуоткрытия  $U_K$  (или отношением  $D_K / f_K$ ). Третий параметр всегда является зависимым и определяется из уравнения [2]:

$$D_K = \frac{4 \cdot f_K \cdot \sin U_K}{1 + \cos U_K} \quad (4)$$

Данные параметры показаны на рисунке 1, отличаются только индексами:  $p$  — для параболоидного концентратора,  $л$  — для концентратора «ЛУЧ».

Используя графоаналитический метод, основанный на геометрических построениях, будем отображать лучи, падающие и отраженные зеркалом. При этом используем закон зеркального отражения и будем рассматривать параллельный пучок лучей, распределение излучения в пучке по направлениям принимаем равномерным. Упрощать конструкцию будем расщеплением параболоида вращения на отдельные конуса [5].

Основное правило при расположении и расчёте конусов концентратора — их проекции на Солнце не должны перекрывать друг друга и полностью, без пропусков, заполнять концентрируемый солнечный поток. Или, площадь улавливаемого солнечного потока  $S_{c.л.}$  равна площади проекций всех конусов  $S_{п.к.}$ . Угол образующей конуса к его оси выбираем таким, чтобы солнечный луч после отражения был направлен в фокус. Понятно, что все конуса имеют один и тот же фокус. Солнечные лучи, попадая на поверхность конуса, отражаются и фокусируются в виде прямой фокусной линии. В центре этой линии расположен приёмник лучистой энергии — вероятнее всего это полая сфера, установленная наверху колонны, в которой происходит движение теплоносителя.

Оптическая система или концентратор гелиоустановки «ЛУЧ», состоит из трех основных элементов: радиусов, конусов, крепежных колец. Их конструктивные размеры определяются при геометрических построениях.

Конусы дистанционируются относительно друг друга радиусами, при этом образуется продуваемая прочная пространственная конструкция, имеющая меньшую парусность. Радиусы представляют собой плоские элементы, имеющие специально вырезанные формы, для крепления конусов под требуемым заданным углом, что является необходимым условием для наилучшего приема потока солнечных лучей. Радиусы закреплены на опорных кольцах, которые крепятся к стойкам. Полный расчёт гелиоконцентратора приведён в [5].

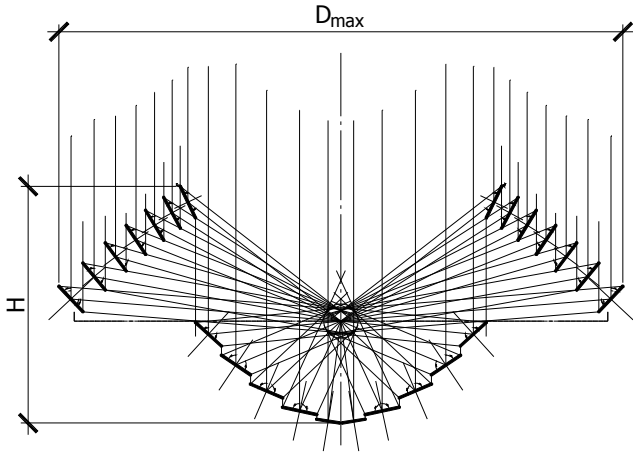


Рис. 2. Концентратор в виде расщепленного параболоида

**Определение коэффициента концентрации.** По завершению расчёта оптической системы мы получаем множество фокусных линий, меняющихся в некотором диапазоне. Центры всех этих линий лежат в точке  $\Phi$ . В этой же точке должен располагаться центр приёмника концентрированного солнечного излучения, желательнее сферической формы. Его размеры обуславливаются размерами полученных фокусных линий, в данном случае от последних «нижних» конусов, точнее поперечным сечением отражённого СИ от последнего «нижнего» конуса, что видно из рисунка 3. По построению получаем диаметр  $d_{П1}$  приёмника, но учитывая не идеальное изготовление отражателей, нужно увеличить принимаемый диаметр на некоторую величину конструктивно и принимать к дальнейшим расчётам диаметр  $d_{П2}$  [6]. Площадь поверхности приёмника  $S_{П}$  будем находить:

$$S_{П} = \pi \cdot d_{П}^2 \quad (5)$$

На приёмнике имеется некоторая область поверхности, на которую не попадает концентрированное солнечное излучение, а только прямое. Эта область характеризуется окружностью диаметром  $d_{ПН}$ . В реальности эта область представляет собой шаровой сегмент, который постоянно передвигается вследствие движения концентратора вокруг теплоприёмника в течение суток, но его площадь остаётся неизменной  $S_{ПН}$ :

$$S_{ПН} = \pi \cdot d_{П} \cdot h_{ПН}, \quad (6)$$

где  $d_{П}$  – принятый диаметр приёмника;  
 $h_{ПН}$  – высота полученного шарового сегмента.

Площадь поверхности приёмника, воспринимающую концентрированное излучение, будем находить так:

$$S_{ПК} = S_{П} - S_{ПН} = \pi \cdot d_{П}^2 - \pi \cdot d_{П} \cdot h_{ПН} = \pi \cdot d_{П} \cdot (d_{П} - h_{ПН}) \quad (7)$$

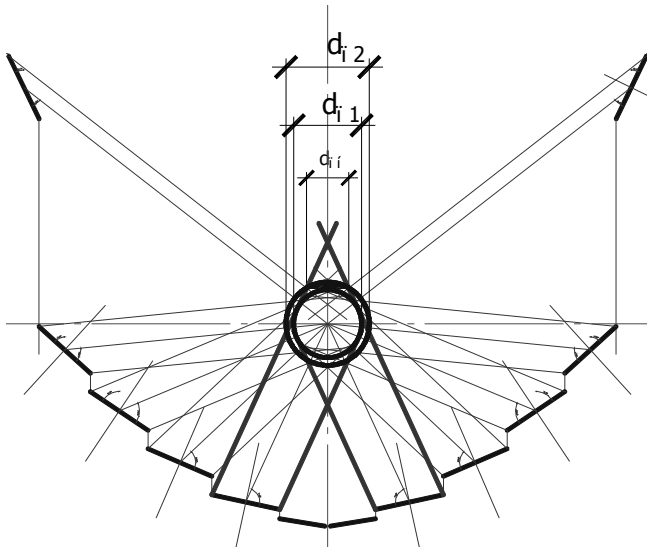


Рис. 3. Определение оптимального размера теплоприёмника

Средний коэффициент концентрации  $K_C$ , для круглых в плане концентраторов площадью  $F_1$  и круглых приёмников площадью  $F_2$  будет равен в нашем случае отношению площади улавливаемого солнечного потока  $S_{с.п.}$ , образованной максимальным радиусом конуса  $R_{max}$ , к площади поверхности приёмника, воспринимающего концентрированное излучение:

$$K_C = \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_{с.п.}}{S_{ПК}} = \frac{\pi \cdot R_{max}^2}{\pi \cdot d_{П} \cdot (d_{П} - h_{ПН})} = \frac{R_{max}^2}{d_{П} \cdot (d_{П} - h_{ПН})} \quad (8)$$

Итогом расчёта концентратора «ЛУЧ» получается схема, показанная на рисунке 2, т.е. поперечное сечение гелиоконцентратора с центральным теплоприёмником, на котором сходятся лучи.

Сопоставляя начальный вариант (концентратор в форме параболоида) и полученный при расчёте при одинаковом диаметре входа солнечных лучей, преимущества второго налицо — простой расчёт, изготовление, высота концентратора меньше при одинаковых характеристиках, большая продуваемость конструкции зеркала. Парусность (кинетическое действие ветра) значительно снижается благодаря продуваемости конструкции. Естественно, небольшая парусность остается, но по сравнению с существующими параболоидами и сферами «продуваемость» ветром существенно выше, следовательно, уменьшается динамическое воздействие потока на гелиоконцентратор.

Т.к. предлагаемый концентратор в виде конусов предусматривается для работы в «бытовых» гелиосистемах (малой мощности), используемых для систем горячего водоснабжения и отопления, то высокая точность концентрации на относительно небольшой поверхности приёмника (как у концентраторов в форме параболоида) не требуется. Чем выше коэффициент концентрации, тем выше температура на поверхности приёмника, а для наших областей применения высокие температуры (выше 100°C) не используются. Поэтому диаметр приёмника может быть больше, чем полученный при построении системы, а так же не нужна и высокая точность системы слежения за траекторией Солнца, что позволяет уменьшить затраты.

**Заключение.** Специфика концентрирования солнечного излучения определяется свойствами первичного источника излучения — Солнца — и особенностями концентрирующих систем, которые относятся к классу оптико-энергетических систем и предназначены исключительно для перераспределения потока солнечного излучения в пространстве с целью повышения его плотности. Дано обобщенное описание свойств тел (элементов), участвующих в процессе переноса и распределения лучистой энергии, т.е. Солнца как первичного излучателя, отражающих элементов концентрирующей системы и поверхности приёмника излучения. Задача концентрирования солнечного излучения состоит в увеличении плотности потока солнечного излучения, попадающего на концентратор, для преобразования в энергию другого вида (в нашем случае тепловую) на приёмнике излучения.

Для расчёта концентратора использовали графоаналитический метод определения энергетических характеристик концентрирующих систем, основанный на геометрических построениях, которые позволяют определить отображение на приёмнике пучка лучей, отражённых элементарной площадкой зеркала. Задаваясь значениями показателей свойств излучателя (Солнца), концентратора и приёмника, и параметров, характеризующих взаимное расположение этих элементов в пространстве, определили закономерности распределения СИ на поверхности приёмника, т.е. энергетические характеристики концентрирующей системы или среднее значение коэффициента концентрации ( $K_C$ ).

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кузьмич, В.В. Расчёт гелиоводонагревательных систем и их применение в сельском хозяйстве. – Минск: БелНИИСХМ, Препринт, 1997. – 87 с.
2. Андреев, В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / В.М. Андреев, В.А. Гриппес, В.Д. Румянцев – Л.: Наука, 1989. – 310 с.

3. Гелиоустановка: пат. 3998 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / В.С. Северянин; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070327 заявл. 02.05.2007, опубл. 01.08.2007.
4. Гелиоконцентратор: пат. 4296 Респ. Беларусь, МПК F 24J 2/00 / В.С. Северянин; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т – № 20070576 заявл. 03.08.2007, опубл. 17.12.2007.
5. Особенности расчета оптической системы гелиоустановки «Луч» / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник Брестского государствен-

- ного технического университета. – 2010. – № 2: Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – С. 74–77.
6. Исследование оптических и теплофизических параметров гелиоустановок с целью оптимизации их использования / П.Ф. Янчилин // Справка-отчет №3 о научно-исследовательской работе, договор с БРФФИ № Т12МВ-048. – 2012. – 23 с.

Материал поступил в редакцию 01.04.13

**YANCHILIN P.F. Optical parameters of the concentrator of the solar power plant "ЛУЧ"**

In article the generalized description of properties of the bodies (elements) participating in process of carrying over and distribution of radiant energy at concentration of a sunlight is given. The joint graphic and analytical method of definition of power characteristics of the concentrating systems, based on geometrical constructions which allow to define display to the receiver of a bunch of the solar beams reflected by a mirror is used.

УДК 662.76

**Павленко С.Н.**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ**

**Введение.** В ряде теплотехнических технологий используется процесс распыления жидкости. Распыление приводит к увеличению коэффициента диффузии и поверхности теплообмена (форсунка Шуховадля топлива, распыление инсектицидов) [1]. Известны также интенсификаторы распыления при помощи пульсаций [2]. В работе [3] показано аналитическое исследование поведения капли жидкости в пульсирующем потоке. В реальных установках – парогенераторах (ПГГ) происходят процессы, требующие экспериментальной проверки распыления жидкости в пульсирующем потоке. ПГГ состоит из камеры пульсирующего горения, выдающей пульсирующий газовый поток, действующий на водяную поверхность или струю воды. Знание этой технологии позволит определить основные размеры ПГГ и уточнить происходящие теплофизические процессы.

**Постановка задачи исследования.** Известно, что динамическое действие потока на объем жидкости имеет следующую физико-математическую модель [2]. Жидкая среда в капле удерживается в одном конгломерате силой поверхностного натяжения, которая проявляется на границе раздела двух фаз и обусловлена молекулярным взаимодействием в жидкости. В данной работе анализ распыления струи базируется на действии потока на каплю.

Капля тем устойчивее, чем больше эта сила. Поэтому тем легче она деформируется, чем ее размеры больше и выше температуры жидкости и газа. Внешними силами, деформирующими каплю, являются динамические воздействия газового потока. Если исключить воздействия силы тяжести, электростатические силы и учитывать только влияние динамического воздействия газового потока на каплю, можно говорить об абсолютной устойчивости неподвижной капли в неподвижной газовой среде.

Задача для численного анализа ставится следующим образом [2]. Имеется окружность как аналог сферы, в каждой точке которой, с одной стороны, действует внутреннее давление, равное

$$p_{вн} = 2\sigma/r \tag{1}$$

где  $\sigma$  – сила поверхностного натяжения;

$r$  – радиус частицы,

а с другой — динамическое давление потока

$$p_{дин} = 0,5W^2\rho_e \cos \alpha, \tag{2}$$

где  $W$  – скорость

$\rho_e$  – плотность газа

$\alpha$  – угол атаки (между осью потока и радиус-вектором) на окружность частицы.

При деформации капли перемещаются частицы окружности (сферы), при этом объем капли (или площадь двумерного аналога) остается постоянным; кроме того, принимается постоянной и поверхность (периметр).

Тогда уравнение перемещения точек периметра окружности можно записать в такой форме:

$$\ddot{r}(\alpha, \tau) = p_{вн} - p_{дин}, \tag{3}$$

где  $\ddot{r}$  – вторая производная радиуса частицы;  
 $\tau$  – время.

Из этой математической модели видно, что деформация капли усиливается при больших радиусах, росте температур, уменьшении плотности жидкости и увеличении плотности газа, но самое главное — при увеличении скоростного напора.

В стационарном газовом потоке максимальная скорость обдувания частицы равна скорости витания (из условия равенства веса частицы и динамического напора, она характеризуется величиной  $\sqrt{4gr_c/(3\rho_e c)}$ ). Поэтому в газовом потоке с постоянной скоростью обдувание для малых частиц пренебрежимо мало. Следовательно, здесь нельзя ожидать качественного распыления жидкости.

В пульсирующем газовом потоке эффективная скорость обдувания [2]:

$$W_{эф} = W\pi/(\omega\lambda\tau') + W_a\ddot{Z}/\sqrt{2}, \tag{4}$$

где  $\omega$  – циклическая частота пульсаций;

$\lambda$  – коэффициент ослабления начальной скорости;

$\ddot{Z}$  – относительная скорость обдувания:  $\ddot{Z} = (W_e - W_c)/W_a$ ;

$\tau'$  – время действия начальной скорости;

$W_e$  – скорость газа;

$W_c$  – скорость частицы;

$W_a$  – амплитудная скорость

$$\ddot{Z} = \sin x / (1 + B^2) + B \cos x / (1 + B^2) - B \exp(-Bx) / (1 + B^2), \tag{5}$$

$$x = 2\pi\tau/T; B = 45\rho_T T_V / (4\pi\rho_e r^2).$$

Экспериментально необходимо изучить влияние частоты пульсаций, температуры потока, средней расходной скорости на эффективность распыления. Трудности непосредственно измерения размера и траектории летящих капель заставили использовать другой параметр геометрической характеристики струи, где размер капель

**Павленко Сергей Николаевич**, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.